

## Modelowanie uwarunkowań zużycia energii elektrycznej regionu

**Streszczenie.** W pracy scharakteryzowano wybrane grupy czynników wpływających na zużycie energii na rozpatrywanym obszarze. Zaprezentowano postępowanie stosowane w tworzeniu modeli ekonometrycznych. Przeprowadzono również ocenę wpływu określonych czynników na poziom obciążenia dla wytypowanego obszaru w oparciu o stworzone modele ekonometryczne.

**Abstract.** Paper presents characteristic of chosen groups of factors that can influence on energy use in the analyzed area. It presents the implemented procedure of econometric modelling. It also consists the valuation of specific factors impact on load level in chosen area based on created econometric models. (*Modelling of electric energy conditions in region*).

**Słowa kluczowe:** modelowanie, obciążenie, energia elektryczna.

**Keywords:** modelling, loads, electricity.

doi:10.12915/pe.2014.02.58

### Wstęp

Problem energochłonności jest jednym z priorytetowych zagadnień polityki energetycznej w Europie. W latach 2005 – 2007 zużycie energii elektrycznej gwałtownie wzrastało, co stanowiło powód do zdecydowanych działań, mających ograniczyć taką tendencję. Lata 2008 - 2009 charakteryzowały się zmniejszeniem zużycia energii. Było to spowodowane kryzysem gospodarczym w Europie i dlatego w okresie 2010 - 2011 odnotowano odwrócenie tendencji spadkowej i zużycie energii ponownie zaczęło rosnąć. Poszukuje się rozwiązań i uregulowań, które pozwolą zminimalizować zużycie energii elektrycznej niezależnie od aktualnego stanu gospodarki.

### Polityka energetyczna

Pierwszym istotnym dokumentem dotyczącym działań na rzecz poprawy efektywności energetycznej była Europejska Karta Energetyczna podpisana w Hadze w grudniu 1991 r. przez 46 państw. Kontynuacją prawnych działań dotyczących zużycia energii był protokół z Kioto z 2005 roku. Jako najważniejsze dokumenty dotyczące uregulowań prawnych w zakresie energii elektrycznej należy jednak wymienić:

- Pakiet energetyczno-klimatyczny (03.2007), znany lepiej jako pakiet 3x20 do 2020 roku, zakładający zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do roku 1990, zmniejszenie zużycia energii o 20% w porównaniu z prognozami dla UE na 2020 rok, zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii do 20% całkowitego zużycia energii w UE,
- Trzeci Pakiet liberalizacyjny (09.2007) traktujący m. in. o rozdzieleniu własnościowym produkcji i przesyłu energii elektrycznej oraz gazu i zwiększeniu możliwości wzajemnej pomocy państw członkowskich w przypadku zagrożenia dostaw energii,
- Pakiet energetyczno-klimatyczny (01.2008) zawierający sześć projektów aktów prawnych, dotyczących promowania energii ze źródeł odnawialnych, norm emisji z samochodów, specyfikacji paliw, wspólnych wysiłków na rzecz redukcji emisji, wychwytywania i składowania dwutlenku węgla i przeglądu europejskiego systemu handlu emisjami,
- Komunikat Komisji Energetycznej „Energia 2020” określający pięć priorytetów dla współczesnej energetyki, tj.: oszczędność energii w sektorach transportu i budownictwa, utworzenie wewnętrznego rynku energii wraz z infrastrukturą, realizację wspólnej europejskiej polityki energetycznej, przywództwo Europy w dziedzinie technologii energetycznych i innowacji oraz zagwarantowanie Europejczykom dostępu do bezpiecznej, pewnej i niedrogiej energii,
- Trzeci Pakiet Energetyczny (03.2011) zawierający 2

dyrektywy rynkowe, 2 rozporządzenia przesyłowe oraz rozporządzenie ustanawiające Agencję ds. Współpracy Organów Regulacji Energetyki,

- Komunikat Komisji Europejskiej w sprawie planu na rzecz efektywności energetycznej oraz Plan działania do przejścia do 2050 roku na konkurencyjną gospodarkę niskoemisyjną (03.2011), proponujący państwom Wspólnoty ogólną strategię przebudowy ich gospodarek energetycznych w kierunku niskoemisyjności,
- Dyrektywę 2012/27/UE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie efektywności energetycznej (10.2012) zmieniającą dyrektywy 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylającą dyrektywy 2004/8/WE i 2006/32/WE.

Dokumenty Europejskie i regulacje krajowe zobowiązują Państwa Unii, w tym także Polskę, do podejmowania działań na rzecz zmniejszenia zużycia energii elektrycznej i poprawy energochłonności. Działania te polegają na:

- wprowadzeniu systemowego mechanizmu wsparcia dla realizacji wzrostu efektywności energetycznej,
- stosowaniu obowiązkowych świadectw charakterystyki energetycznej dla budynków i mieszkań przy wprowadzaniu ich do obrotu oraz wynajmu,
- określeniu energochłonności urządzeń i produktów zużywających energię,
- wsparciu inwestycji w zakresie oszczędności energii przy zastosowaniu kredytów preferencyjnych oraz dotacji ze środków krajowych i europejskich,
- zastosowaniu technik zarządzania popytem - DSM (ang. *demand side management*), stymulowanym poprzez efektywne wykorzystanie energii, czyli zmniejszenie zużycia energii elektrycznej oraz reakcją strony popytowej - DSR (ang. *demand side response*), kształtowaniu krzywej obciążeń poprzez sterowanie obciążeniem, czyli zmniejszenie obciążenia lub przesunięcie obciążenia na okres poza szczytem,
- kampaniach informacyjnych i edukacyjnych promujących racjonalne wykorzystanie energii.

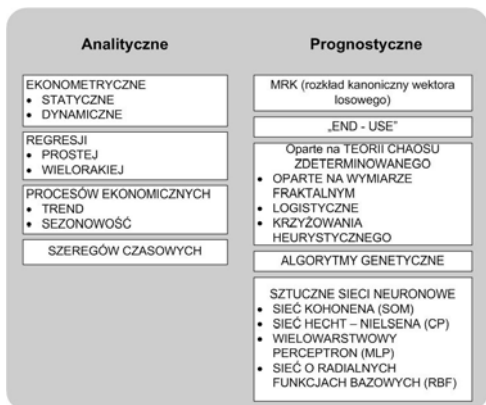
W zakresie przedsiębiorstwa podstawą oszczędności energii jest właściwe zarządzanie polegające na: planowaniu działań, właściwej organizacji procesu technologicznego, gospodarce czynnikiem ludzkim, kontroli i analizie techniczno-ekonomicznej, planowaniu i wprowadzaniu usprawnień i modernizacji. Właściwe zarządzanie gospodarką energetyczną zarówno na poziomie państwa, jak i przedsiębiorstwa, wymaga właściwego monitorowania, modelowania, analizowania i planowania zużycia energii [1]. Świadome zachowania odbiorców energii mają znaczny wpływ na zarządzanie całą siecią elektroenergetyczną i mogą być wykorzystane jako element zwiększający jej efektywność, podnoszący jakość, obniżający koszty oraz integrujący rozproszone źródła

energii. Wszystkie działania związane z aktywnym zachowaniem prosumentów określa się jako Zintegrowane Zapotrzebowanie na Energię - DSI (ang. *Demand Side Integration*).

W zakresie monitorowania zużycia energii pracuje się nad wdrażaniem nowoczesnych rozwiązań, znanych jako „smart metering”. Umożliwiają one komunikację między sprzedawcą a odbiorcą energii w czasie rzeczywistym, a także bieżące kontrolowanie zużycia energii u odbiorcy w oparciu o informacje o aktualnej cenie energii.

### Modelowanie zjawisk

W zależności od celu sporządzania modelu wyróżnia się wiele rodzajów i klas modeli. Najintensywniej rozwijane i badane modele to modele prognostyczne [2]. Obecnie w prognozowaniu najczęściej wykorzystuje się modele oparte na sztucznych sieciach neuronowych [3] i algorytmy genetyczne, ponieważ dają najlepsze rezultaty [4], ale wśród popularnych modeli należy wymienić również typy „end-use” i MRK [5], [6]. W zakresie analizy zużycia energii najpowszechniej wykorzystywane modele to: regresji, procesów ekonomicznych i szeregów czasowych, które jednak tylko informują o pewnych tendencjach, nie dając przy tym odpowiedzi na pytania o przyczynowość zjawiska, zwłaszcza, gdy przyczyn jest wiele [1]. W takiej sytuacji przydatne są modele ekonometryczne, które opisują zjawiska uwzględniając wiele czynników zewnętrznych (rys.1).



Rys.1. Rodzaje modelowania

Rozszerzeniem modelu ekonometrycznego, pozwalającym uwzględnić również wpływ takich czynników jak trend, sezonowość i wartości z poprzednich okresów jest modelowanie zgodne z koncepcją zaproponowaną przez prof. Z. Zielińskiego. Istotą postępowania w tej metodzie jest budowa modelu przyczynowo - skutkowego z uwzględnieniem informacji o wewnętrznej strukturze badanych procesów (trend, sezonowość, autoregresja) w taki sposób, aby proces resztowy miał własności „białego szumu” [7].

### Czynniki wpływające na zużycie energii elektrycznej

Podstawą skonstruowania modelu analitycznego, czy też prognostycznego jest znajomość czynników wpływających na badaną wartość. Wytypowanie czynników jest procesem wymagającym szczegółowej analizy i znajomości charakteru danego zjawiska. Bada się zarówno czynniki pogodowe [8], [9], społeczne [10] i inne [11]. Na wstępie wybiera się więc potencjalne czynniki, które mogą wpływać na zjawisko. Kolejnym etapem jest ustalenie charakteru badanych wielkości, określenie wpływu zmian wartości analizowanych czynników oraz weryfikacja doboru czynników za pomocą odpowiednich testów statystycznych.

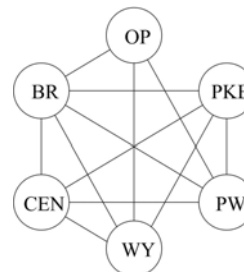
Przedstawione w artykule badania przeprowadzono dla

jednego z operatorów systemu elektroenergetycznego o powierzchni ok. 27 tys. km<sup>2</sup>, z liczbą prawie 2 mln odbiorców. Zakres działania operatora obejmuje głównie Dolny Śląsk, gdzie znajduje się pięć obszarów energetycznych: Obszar I, Obszar II, Obszar III, Obszar IV i Obszar V. W analizie uwzględniono także wpływ czterech wybranych odbiorców przemysłowych z grupy odbiorców bardzo dużych lub dużych, zwanych dalej: Odbiorca R (branża chemiczna), Odbiorca K (branża chemiczna), Odbiorca H (branża metalurgiczna) i Odbiorca L (branża spożywcza). Ocenie poddano wybrane obszary, grupy odbiorców kwalifikowanych wg taryf oraz wybranych odbiorców przemysłowych. Na potrzeby stworzenia modeli ekonometrycznych zużycia energii w badanych obszarze wytypowano czynniki przedstawione na rysunku 2.



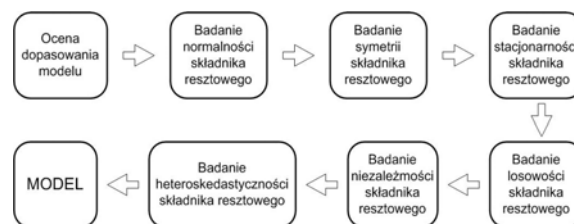
Rys. 2. Podział czynników wpływających na zużycie energii elektrycznej

Następnie przeprowadzono testy zmienności i istotności dla każdej ze zmiennych. Po wyeliminowaniu zmiennych o niewystarczającej zmienności w czasie i nieistotnym skorelowaniu ze zmienną objaśnianą skorzystano z metody graficznej (rys. 3) i analizy współczynników korelacji, aby wyeliminować zmienne, będące nośnikami tych samych informacji [12].



Rys.3. Graf powiązań zmiennych objaśniających

Po wytypowaniu czynników właściwych dla danego modelu określano postać analityczną modelu, a następnie estymowano jego parametry za pomocą klasycznej metody najmniejszych kwadratów [13]. Tak powstały model oceniano ze względu na jego wyrazistość i stopień dopasowania, a następnie testowano właściwości składnika losowego (rys. 4). Model, który spełniał wszystkie postawione założenia dla modelu liniowego uznawano za przydatny [14].



Rys. 4. Realizowany sposób testowania modeli

### Studium przypadku

W ramach badań nad gospodarką energetyczną obszaru stworzono kilkadziesiąt modeli ekonometrycznych opisujących zużycie energii elektrycznej[?]. Kilka z nich, opisujących zużycie energii elektrycznej dla wybranego obszaru w ciągu kilku lat przedstawiają zależności 1-5.

- (1)  $E = 3,5 \cdot 10^3 \cdot \log PKB + 22,3 \cdot 10^3$
- (2)  $A = 0,6 \cdot 10^3 \cdot \log PKB + 5,0 \cdot 10^3$
- (3)  $B = 2,0 \cdot 10^3 \cdot \log PKB + 10,4 \cdot 10^3$
- (4)  $C = 0,5 \cdot 10^3 \cdot \log PKB + 3,2 \cdot 10^3$
- (5)  $G = 0,4 \cdot 10^3 \cdot \log PKB + 3,7 \cdot 10^3$

gdzie:  $E$  – zużycie energii elektrycznej (w Obszarach I, II, IV, i V),  $A, B, C, G$  – zużycie energii elektrycznej przez odbiorców z grupy taryfowej  $A, B, C, G$  (w Obszarach I, II, IV i V),  $PKB$  – produkt krajowy brutto.

Modele 1 – 5 są modelami ekonometrycznymi, nieliniowymi sprowadzalnymi do liniowych. Opisane przez nie zużycie energii odznaczało się silnym powiązaniem ze zmianami PKB, przy czym zależność ta była logarytmiczna. Ocenę dopasowania stworzonych modeli przedstawia tabela 1.

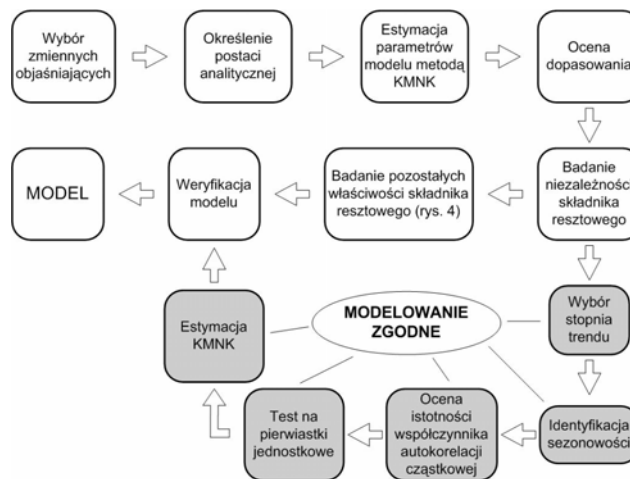
Tabela 1. Zestawienie i ocena stworzonych modeli

Typ odbiorcy	Analiza ekonometryczna	
	Horyzont analizowanych danych w latach	Model ekonometryczny
E	6	x x x
A	6	x
B	6	x x x
C	6	x x
G	6	x x x
Dopasowanie modelu	< 0,5	-
	[0,5 - 0,8)	x
	[0,8 - 0,95)	x x
	> 0,95	x x x

Analizując zużycie energii elektrycznej w wybranym obszarze dla poszczególnych lat zauważa się, że niezależnie od taryfy, zużycie energii jest najsilniej zależne od zmian PKB (wzory 1 - 5). Jednocześnie czynniki takie jak liczba zatrudnionych w działalności badawczo-rozwojowej, nakłady inwestycyjne, procent przedsiębiorstw inwestujących w działalność badawczo-rozwojową i liczba odbiorców nie są wystarczająco zmienne, aby określić ich wpływ na zużycie energii w badanym obszarze. Wzrost PKB wiąże się ze zwiększeniem zużycia energii elektrycznej (modele 1 - 5). Najsilniejszy związek korelacyjny widoczny jest dla odbiorców z grup E?, B i G. Zużycie energii elektrycznej jest też silnie zależne od środków przeznaczanych na działalność badawczo-rozwojową oraz od cen energii. Zmienne te nie są jednak uwzględniane w modelach ze względu na silne skorelowanie ze zmienną PKB. Zwiększenie środków na działalność badawczo - rozwojową wiąże się ze wzrostem zużycia energii. Zużycie energii elektrycznej jest też zależne od poziomu wynagrodzeń w taki sposób, że wzrost wynagrodzeń odpowiada zwiększeniu zużycia energii.

W ramach omawianych badań przeprowadzono również analizę zależności zużycia energii elektrycznej od

wybranych czynników w ciągu roku. W tym celu skonstruowano modele ekonometryczne, posługując się m. in. koncepcją modelowania zgodnego z uwagi na silną sezonowość rozpatrywanych danych, która objawiała się brakiem niezależności składnika resztowego. Sposób konstruowania modeli przedstawia rysunek 5. Tak jak w przypadku modeli dla danych rocznych w pierwszej kolejności dokonywano wyboru zmiennych objaśniających, następnie określano postać analityczną modelu i estymowano jej parametry za pomocą KMNK ???. Następnie przeprowadzano ocenę dopasowania modelu do danych empirycznych i badano właściwości składnika resztowego. Jako pierwszą badano niezależność. Brak niezależności wynikał często z nieuwzględnionej sezonowości danych. W takiej sytuacji określano ponownie postać analityczną modelu zgodnie z koncepcją modelowania zgodnego, tj. dokonywano wyboru stopnia trendu, identyfikowano sezonowość, oceniano istotność współczynnika autokorelacji i przeprowadzano test na pierwiastki jednostkowe [15]. Tak otrzymaną postać estymowano za pomocą KMNK. Następnie przeprowadzano dalszą weryfikację modelu.



Rys. 5. Procedura konstrukcji modeli

W efekcie zastosowania procedury, przedstawionej na rysunku 5, skonstruowano kilkanaście modeli opisujących zużycie energii elektrycznej w ciągu roku przez wybrane grupy odbiorców. Przykładową postać modelu przedstawia zależność 6

$$\begin{aligned}
 E = & 9,6 \cdot 10^5 \cdot t - 6,7 \cdot 10^6 \cdot T + 5,3 \cdot 10^6 \cdot T_{t-1} + \\
 & -1,1 \cdot 10^8 \cdot m_2 - 1,4 \cdot 10^8 \cdot m_4 - 9,8 \cdot 10^7 \cdot m_5 + \\
 (6) \quad & -1,4 \cdot 10^8 \cdot m_6 - 8,1 \cdot 10^7 \cdot m_7 - 9,7 \cdot 10^7 \cdot m_8 + \\
 & -6,8 \cdot 10^7 \cdot m_9 - 4,4 \cdot 10^7 \cdot m_{11} + 5,3 \cdot E_{t-1} + \\
 & + 0,2 \cdot E_{t-3} + 5,6 \cdot 10^8
 \end{aligned}$$

gdzie:  $E$  – roczne zużycie energii elektrycznej (w Obszarach I, II, IV i V),  $E_{t-n}$  – zużycie energii elektrycznej sprzed  $n$  miesięcy (w Obszarach I, II, IV i V),  $m_2, m_4, m_5, m_6, m_7, m_8, m_9, m_{11}$  – miesięczne zmienne sezonowe,  $T$  – średnia temperatura powietrza w obszarze.

Skonstruowane modele pozwoliły ocenić, że:

- czynnikiem pogodowym najsilniej oddziałującym na zużycie energii w ciągu roku jest temperatura powietrza, przy czym w zależności od odbiorcy jest to temperatura maksymalna, minimalna lub średnia,

- w zależności od napięcia zasilania wybranych odbiorców wpływ czynników pogodowych jest różny, najbardziej niezależni od czynników meteorologicznych są odbiorcy z grupy B,
- parametry takie jak: ciśnienie, wilgotność i widzialność nie wykazują wystarczającej zmienności w badanym obszarze,
- czynniki meteorologiczne są ze sobą ściśle powiązane i dlatego w modelach wystarczy uwzględnić jeden z nich, aby określić oddziaływane pozostałych,
- każdy z badanych procesów zużycia energii elektrycznej charakteryzuje się powtarzalnymi odchyleniami sezonowymi,
- nie widać podobieństw pomiędzy różnymi grupami odbiorców odnośnie do okresów występowania odchyleń sezonowych, aczkolwiek odchylenia te są zazwyczaj częste i znaczące,
- zmienną sezonową, która nie występuje dla żadnego modelu jest zmienna zużycia energii w grudniu, co oznacza, że miesiąc ten charakteryzuje się największą losowością,
- badane procesy są przeważnie procesami dynamicznymi, tj. silnie uzależnionymi od wartości zmiennych objaśnianych i objaśniających z okresów poprzednich,
- całkowite zużycie na obszarze działania rozpatrywanego Operatora uzależnione jest od bieżącej temperatury i wartości tej zmiennej z poprzedniego okresu, sprzed miesiąca. Jest to również proces autoregresyjny, zależny od wartości własnych sprzed jednego i trzech miesięcy.

## Wnioski

Postępujący rozwój technologiczno-gospodarczy wiąże się ze wzrostem zużycia energii elektrycznej. Z powodu ograniczonej ilości kopalin i postępującego zanieczyszczenia środowiska państwa UE poszukują rozwiązań, które pozwoliłyby na transformację ich gospodarek w niskoemisyjne i bardziej efektywne. Poszukuje się nowych, bardziej ekologicznych źródeł energii. Badania nad gospodarką energetyczną stanowią podstawę do jej transformacji.

Znajomość czynników wpływających na wielkość zużycia energii elektrycznej w wybranym obszarze daje możliwość kształtowania krzywych obciążeń oraz prognozowania ich kształtu i wartości. W zależności od rozpatrywanego obszaru bądź analizowanego horyzontu czasowego czynniki te różnią się między sobą. Właściwe wytypowanie tych czynników jest podstawą do stworzenia analitycznych modeli ekonometrycznych, pozwalających sprecyzować powiązanie zużycia energii elektrycznej z czynnikami zewnętrznymi: technologicznymi, socjoekonomicznymi, politycznymi i meteorologicznymi.

Przeprowadzona analiza ekonometryczna, oparta na stworzonych na potrzeby badań modelach wykazała, że zużycie energii elektrycznej w badanym obszarze w analizowanych latach było ściśle powiązane z czynnikami

takimi jak PKB, środki na działalność badawczo-rozwojową i średnie wynagrodzenie brutto. Można stwierdzić, na podstawie przeprowadzonych badań, że zużycie energii elektrycznej w analizowanym obszarze zależne jest najbardziej od rozwoju gospodarczego regionu. Jednocześnie zużycie energii w ciągu roku najsilniej powiązane jest z tendencjami sezonowymi i warunkami pogodowymi, głównie temperaturą powietrza.

## LITERATURA

- [1] Malko J., Wybrane zagadnienia prognozowania w elektroenergetyce – prognozowanie zapotrzebowania energii i mocy elektrycznej. Wrocław 1995.
- [2] Praca zbiorowa pod redakcją I. Dobrzańskiej, Prognozowanie w elektroenergetyce. Zagadnienia wybrane. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2012.
- [3] Baczyński D., Piotrowski P., Helt P., Wasilewski., Opracowanie projektu modułu prognozowania średnioterminowego i długoterminowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Praca na zlecenie *Globema*, Warszawa 2011.
- [4] Piotrowski P., Analiza skuteczności wybranych metod wieloletnich rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną na potrzeby spółek dystrybucyjnych. *Elektro info*, 6 (2010), 82-88.
- [5] Piotrowski P., Analiza statystyczna oraz prognozy godzinowej produkcji energii przez elektrownię wiatrową z horyzontem 1 godziny. *Elektro info* 3 (2012), 90-95.
- [6] Piotrowski P., Analiza statystyczna oraz prognozy godzinowej produkcji energii przez elektrownię wiatrową z horyzontem 1 doby. *Elektro info* 4 (2012), 48-52.
- [7] Kufel T., Modelowanie „od ogólnego do szczególnego” i modelowanie zgodne w PcGets. Dynamiczne modele ekonometryczne – VI Ogólnopolskie Seminarium Naukowe, Toruń 2003.
- [8] Łyp J., Problematyka krótkoterminowego prognozowania obciążeń elektroenergetycznych dla potrzeb uczestnictwa w rynku energii, *Polityka energetyczna*, 9 (2006), 157-169.
- [9] Moral C., Vicenns O., Modeling the non-linear response of Spanish electricity demand to temperature variations. *Energy Economics*, 27(2005), 3, 477-494.
- [10] Dąsal K., Popławski T., Starczynowska A., Badanie wpływu czynników pozapogodowych na zmiany obciążenia w KSE, *Polityka Energetyczna*, 13 (2010), 2, 91-104.
- [11] Napieralska I., Analiza przebiegów obciążenia krajowego systemu elektroenergetycznego oraz ocena perspektywicznego wykresu dla doby szczytu i doliny rocznej w latach 2000 i 2010. *Raport serii SPR 2010*.
- [12] Nowak E., Zarys metod ekonometrii. Zbiór zadań. PWN, Warszawa 2006.
- [13] Maddala G.S., Ekonometria. PWN, Warszawa 2006.
- [14] Dziechciarz J., Ekonometria. Metody, przykłady, zadania. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej, Wrocław 2003.
- [15] Kufel T., Ekonometria. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem programu GRETL, PWN, Warszawa 2007.

**Autorzy:** mgr inż. *Wiktoria Grycan*, [wiktoria.grycan@pwr.wroc.pl](mailto:wiktoria.grycan@pwr.wroc.pl),  
dr hab. inż. *Bogumiła Wnukowska* [boqumila.wnukowska@pwr.wroc.pl](mailto:boqumila.wnukowska@pwr.wroc.pl),  
prof. dr hab. inż. *Zbigniew Wróblewski* [zbigniew.wroblewski@pwr.wroc.pl](mailto:zbigniew.wroblewski@pwr.wroc.pl) Politechnika Wrocławska,  
Instytut Energoelektryki, Zakład Elektroenergetyki Przemysłowej,  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław